



地学前缘  
*Earth Science Frontiers*  
ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

## 《地学前缘》网络首发论文

题目: 基于反射波地震勘探技术的深覆盖区夕卡岩型富铁矿找矿方法探讨  
作者: 朱裕振, 孙超, 王怀洪, 任珂, 张文艳, 沈立军  
DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.3.37  
收稿日期: 2024-01-23  
网络首发日期: 2025-03-18  
引用格式: 朱裕振, 孙超, 王怀洪, 任珂, 张文艳, 沈立军. 基于反射波地震勘探技术的深覆盖区夕卡岩型富铁矿找矿方法探讨[J/OL]. 地学前缘.  
<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.3.37>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.3.37

# 基于反射波地震勘探技术的深覆盖区夕卡岩型富铁矿找矿方法探讨

朱裕振, 孙超\*, 王怀洪, 任珂, 张文艳, 沈立军

1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南, 250104
2. 中国地球物理学会煤田地球物理重点实验室, 山东 济南, 250104

ZHU Yuzhen, SUN Chao\*, WANG Huaihong, REN Ke, ZHANG Wenyan, SHEN Lijun

1. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, China
2. Key Laboratory of Coal Geophysics, Chinese Geophysical Society, Jinan 250104, China

**ZHU Yuzhen, SUN Chao, WANG Huaihong, et al. Discussion on prospecting methods for rich iron ore in deep coverage areas based on reflected wave seismic exploration technology. *Earth Science Frontiers*, 2025**

**Abstract:** Since the discovery of skarn-type rich iron ore deposits in the Qihe-Yucheng area in 2015, a variety of geophysical exploration work including ground gravity magnetic and electromagnetic methods have been carried out. However, due to the deep coverage of the area, the deposit is deep-buried and the mineralization information is weak, resulting in a severe multi-solution problem in the data interpretation. Seismic exploration technology has the advantages of large detection depth and high precision. This article applies this method to deep rich iron ore prospecting for the first time. By adopting a wide-line observation system and focusing on improving the signal-to-noise ratio of deep data, high-quality processed profiles were obtained. By analyzing the characteristics of seismic wave groups in different strata, we achieved the accurate division of the Cenozoic bottom boundary and the Carboniferous-Permian system, and delineated the occurrence range of intrusive rock masses, which provided accurate horizon and structural constraints for joint gravity and magnetic inversion. Therefore, it can distinguish the local gravity and magnetic anomalies caused by the burial depth and morphological changes of the rock mass, highlights the ore-induced superimposed secondary anomalies, greatly reduces the multiple solutions of the joint gravity and magnetic inversion, improves the ore body positioning accuracy, so as to guides the layout of ZK11 borehole and successfully encountered rich iron ore. The drilling results revealed the stratigraphic and depth information predicted by seismics are highly consistent with drilling, indicating that seismic methods have good application effects and broad application prospects in prospecting for rich iron ores in deep coverage areas.

**Key words:** rich iron ore; Qihe-Yucheng area; seismic exploration; prospecting prediction

**摘要:** 齐河—禹城地区自 2015 年发现夕卡岩型富铁矿后, 相继开展了包括地面重磁、电磁法等在内的多种地球物理探测工作, 但由于该区处于深覆盖区, 矿藏埋深大、矿化信息弱, 数据解释工作存在较大多解

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2903702; 2022YFC2903705); 山东省地质勘查项目[鲁勘字(2022)25 号]

作者简介: 朱裕振 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质找矿与地球物理勘查工作。Email: zhuyuzhen2008@163.com

\*通讯作者简介: 孙超 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事煤及金属矿地震勘探工作。E-mail: 1002895568@qq.com

性问题。地震勘探技术具有探测深度大、精度高等特点,本文首次将该方法应用于深部富铁矿找矿。通过采用宽线观测系统,以提高深部资料信噪比为重点,获得了高质量的处理剖面;对不同地层的地震波组特征进行分析,实现了新生界底界、石炭—二叠系的准确划分,圈定了侵入岩体的赋存范围,为重磁联合反演提供了准确的层位、构造约束;从而可分辨因岩体埋深、形态变化造成的重磁局部异常,有效识别矿致叠加异常,降低重磁联合反演的多解性,提高矿体定位精度,进而指导 ZK11 钻孔布设并成功见矿。从揭露情况看,地震预测的地层及深度信息与钻探吻合程度高,表明了地震方法在深覆盖区富铁矿找矿具有良好的应用效果和广阔的应用前景。

**关键词:** 富铁矿; 齐河—禹城地区; 地震勘探; 找矿预测

**中图分类号:** P597 **文献标志码:** A

## 0 引言

富铁矿作为钢铁生产的主要原材料,是我国紧缺的战略性矿产资源。夕卡岩型铁矿是我国最重要的富铁矿来源,而华北克拉通已发现数个大型夕卡岩型富铁矿矿集区,其成矿特点表现为铁矿体主要赋存于早白垩世(约 130 Ma)闪长质岩石与奥陶纪灰岩的接触带中,该类型铁矿被称为邯邢式铁矿<sup>[1-2]</sup>。山东省煤田地质规划勘察研究院 2015 年在齐河—禹城地区首次发现夕卡岩型富铁矿,具有富磁铁矿体厚度大、品位高的特点,与传统的邯邢式铁矿不同的是,部分富铁矿矿体产于石炭纪—二叠纪沉积碎屑岩中,为华北地区富铁矿找矿开辟了新的找矿思路,具有较大的资源潜力和广阔的找矿前景<sup>[3-6]</sup>。

自矿床发现以来,诸多学者在该区进行了系统研究<sup>[7-12]</sup>。在成矿理论方面,针对区内富铁矿成矿岩体基本特征、形成演化以及找矿标志进行了分析总结<sup>[13-14]</sup>,在此基础上,通过航空磁测、地面磁测以及重力等技术方法,分析并反演地球物理原始数据,在磁化率分布特点总结、磁异常范围圈定等方面形成一系列研究认识成果<sup>[15-16]</sup>。这些研究从成矿地质条件、成矿规律与找矿标志、磁异常分布等方面进行了系统分析,在前期较好的指导了区内的铁矿勘查工作。但齐河—禹城地区富铁矿床属于夕卡岩型铁矿,矿致磁异常的矿化信息减弱,对于直接识别矿体的空间分布具有多解性,影响了找矿工作的进一步开展<sup>[17]</sup>。

地震勘探作为深部找矿的物探方法之一,具有勘探精度高、分辨率高、穿透深度大等优势,长期以来在油气、煤炭等能源矿产勘查领域应用广泛<sup>[18]</sup>。随着金属矿产勘查走向深部,国内外将地震勘探技术应用在多个金属矿勘探实践工作中<sup>[19-23]</sup>,面对金属矿复杂的成矿地质条件,地震勘探技术对深部地层结构以及复杂构造的精细刻画,使其具有显著的优势。加拿大、澳大利亚、南非等国家在多个硬岩地区开展了研究与试验,发现了典型火山沉积中硫化物矿床的地震强反射特征,清楚的展示了地震对硫化物大规模构造成像的潜力<sup>[24-26]</sup>。国内诸多学者通过地震层析成像和高精度反射地震,探明了斑岩型钼矿床、斑岩型铜矿等多个金属、多金属矿区的地层和复杂构造特征,寻找并圈定了火山机构、隐爆角砾岩筒等深部隐伏岩体分布范围<sup>[27-30]</sup>。这些工作表明地震方法相较于常规的勘查方法,在深部金属矿产勘查中对地层结构和地质构造具有更为清晰的刻画能力。

夕卡岩型富铁矿深部成矿地质体结构复杂,重磁联合反演中难以区分矿与非矿异常,反演结果存在多解性,本文将地震方法首次应用于深覆盖区富铁矿找矿工作,在成矿地质背景及磁异常分析的基础上,查明该区地层结构、地质构造及闪长岩体侵入接触范围,为重磁反

演提供精确的层位约束，减少单一手段的多解性，提升勘查效率和找矿效果。

# 1 成矿地质背景

研究区位于山东省西北部，行政区划主要属德州市管辖，部分属聊城市管辖，其大地构造位置属华北板块（Ⅰ级）、鲁西隆起区（Ⅱ级）、鲁中隆起（Ⅲ级）、泰山—济南断隆（Ⅳ级）、齐河潜凸起（Ⅴ级）。该区新生界广泛分布，尤以第四系和新近系分布最为广泛，古生界主要为寒武系、奥陶系和石炭系—二叠系，均被新生界覆盖，地表无基岩露头。区域构造活动强烈，以断裂构造为主，褶皱构造局部发育。总体上主要分布有北东—北北东向、北西—北北西向、近东西向 3 组断裂构造，且以前两者较发育，南北向断层在该区不发育（图 1a）。区内岩浆岩分布广泛，主要发育有新太古代酸性侵入岩和中生代中基性侵入岩。区内李屯地区 zk1 钻孔柱状简图见图 1b。

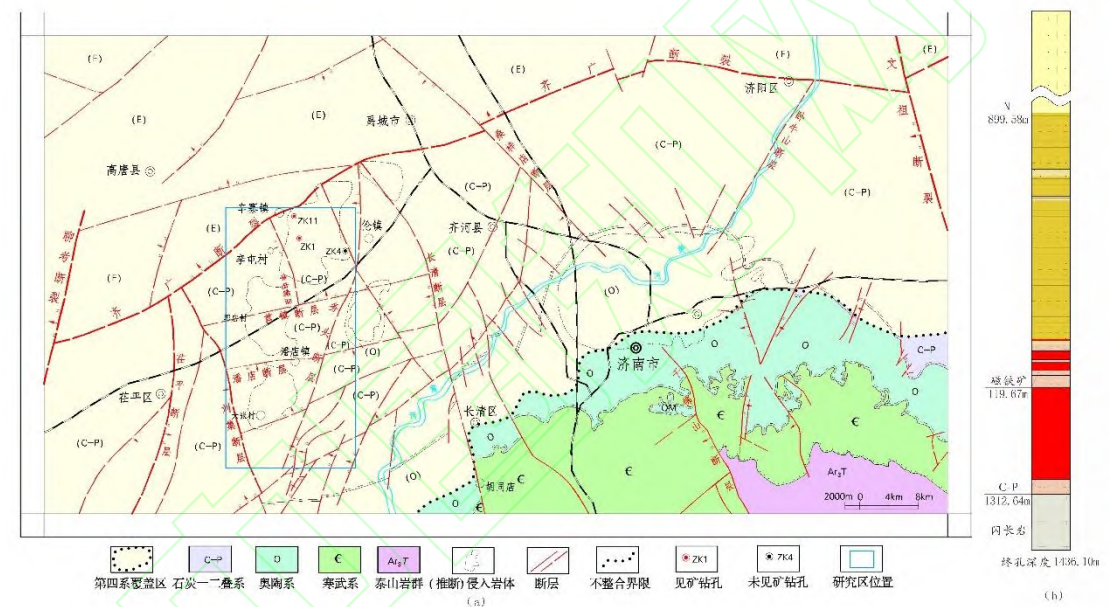


图 1 研究区区域地质略图及李屯地区钻孔简图

Fig.1 Regional geological sketch of the study area and drilling sketch of the Litun area

研究区内铁矿勘查工作成果表明，区内铁矿与济南铁矿、莱芜铁矿属同一成因，均为夕卡岩型磁铁矿。矿体主要赋存于燕山晚期中基性闪长岩与奥陶系马家沟群灰岩和石炭—二叠系的接触带上，其赋存形态与碳酸盐岩、碎屑岩地层和闪长岩体的接触关系的构造形态密切相关<sup>[5, 14]</sup>。

## 2 研究区地球物理特征

### 2.1 磁场特征

研究区及附近代表性钻孔岩（矿）石物性测试结果显示<sup>[31]</sup>，区内磁性强度整体遵循磁铁

矿>闪长岩>泰山岩群>沉积岩的物性规律。夕卡岩型铁矿石的总体磁化率和剩余磁化强度明显高于围岩和闪长岩体，为本区利用磁法探测磁铁矿体提供了地球物理基础。

本文采用的磁场资料来源于 2013 年山东省煤田地质规划勘察研究院在研究区采集的地面 1:1 万地面高精度磁测数据，为了获取所探测目标地质体的异常信息，采用中国地质大学（武汉）的 GMS 软件对资料进行了化极、垂向一阶导数和求剩余异常等数据处理来突出目标体的异常特征。

从高精度磁测  $\Delta T$  等值线平面图（图 2a）可以看出，异常整体往北东向延伸，局部异常特征有所差异。其中，异常中间小刘庄地区局部异常往北西方向凸起，异常西北部叠道地区局部异常往北西西方向凸起，异常东部城子坡南局部异常往东南方向凸起，均为等值线密集、异常变化剧烈的区域。化极后（图 2b）的异常整体往北偏移，异常特征更加明显，可以看出小刘庄、叠道和城子坡南为整体异常上的局部异常中心或者凸起部位。通过磁异常的垂向一阶导数（图 2c）可以在一定程度上突出局部异常，此时小刘庄、叠道和城子坡南均位于相对独立的异常中心位置，异常特征更加明显。研究区内主要磁异常特征是由深部闪长岩体引起的，通过剥离背景场、求取剩余磁异常（图 2d），可以更明显的突出三处局部异常。据此，圈定了区内 3 处局部异常明显且异常特征相近的找矿靶区（图 2a），分别为 C1，C2，C3。

区内在 C1 靶区最先布设的 ZK1 钻孔见富铁矿，见矿深度 1 157.38 m，矿体厚度 119.67m，后续在 C2 靶内布置了 ZK3、ZK4 钻孔，但均未见矿。从钻孔揭露情况来看，新生界底界深度分别为 850.68 m、762.58 m，过新生界后未揭露石炭—二叠纪地层，直接见巨厚闪长岩体。



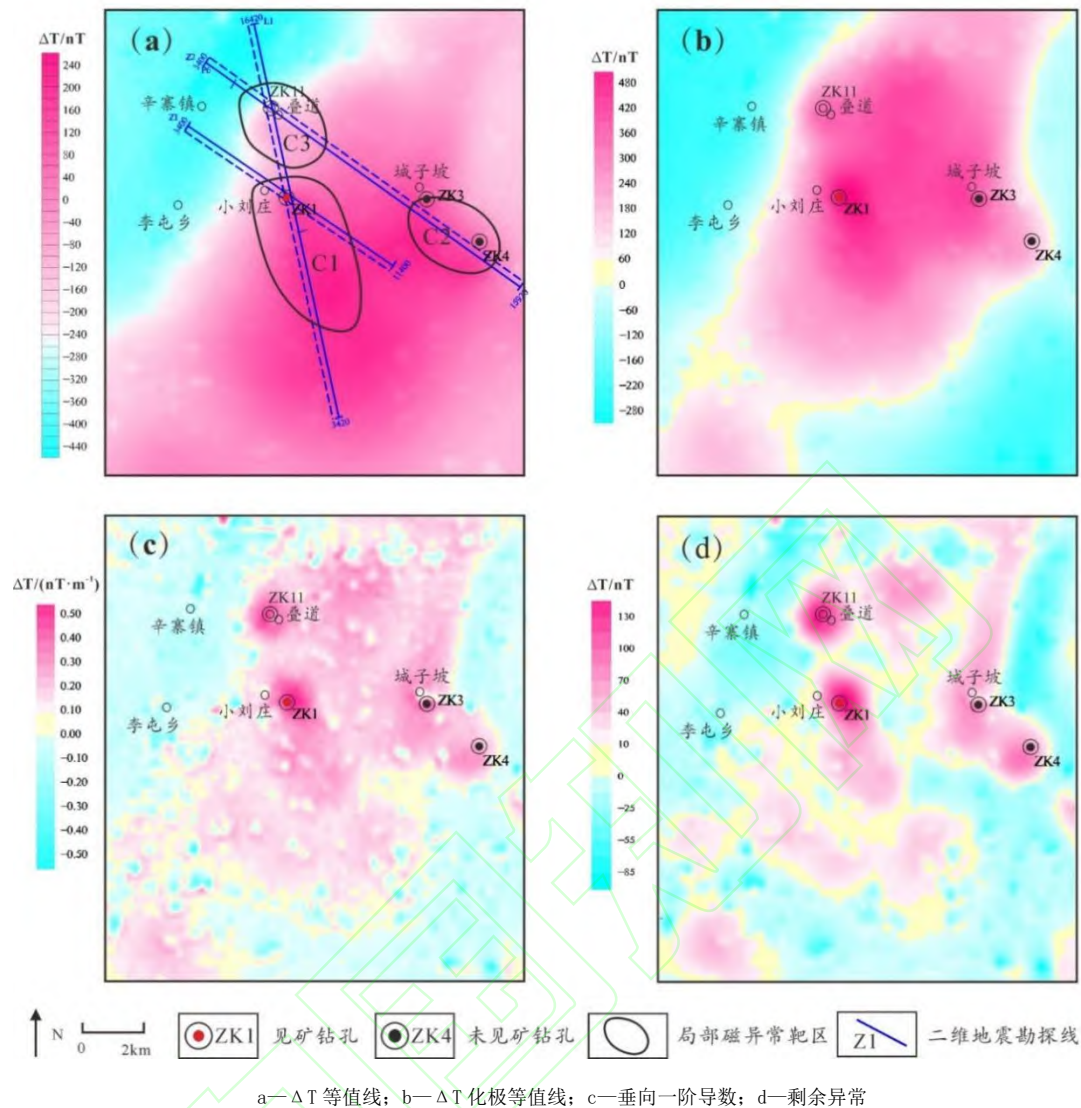


图 2 地面高精度磁测异常等值线平面图

Fig.2 High-precision magnetic anomalies on the ground

## 2.2 深部磁异常特征模型试验

根据以往钻探揭露情况, 设计了研究区两种不同情况下的理论模型, 图 3a 表示存在磁铁矿体, 图 3b 表示不存在磁铁矿体。从图中可以看出, 在磁铁矿体埋藏 1 200 m, 磁异常值可达到 60 nT; 而在相同地质条件下, 不存在磁铁矿体时, 岩体凸起埋藏 750 m 时, 磁异常值也可达到 60 nT。这说明磁异常信息具有多解性, 仅根据磁异常特征指导钻孔布设存在不确定性, 需要采用多种方法技术, 排除因岩体导致的磁异常, 从而提高矿致异常识别准确度, 确定找矿有利地段。

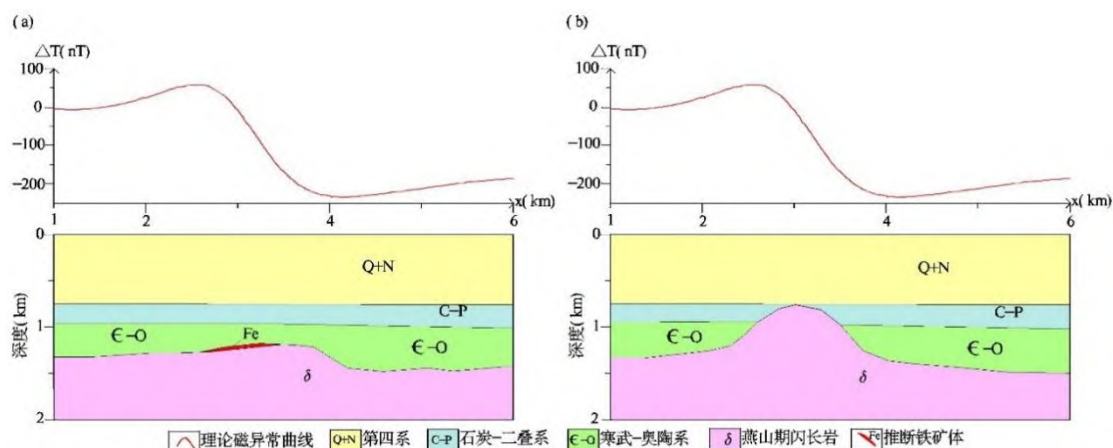


图3 理论模型磁异常特征  
Fig.3 Characteristics of magnetic anomalies in the theoretical model

### 2.3 中深层地震地质条件

区内新生界冲积物底界面松散层与下伏基岩物性差异极大,同时基岩面由于遭受长期风化剥蚀作用,表面较为平整光滑,所以此界面是良好波阻抗界面,可以形成较强的反射波。石炭—二叠纪等沉积地层因岩性和形成时期的差异,部分可形成反射波,但受岩浆岩影响区域石炭—二叠纪地层破碎,很难形成横向连续反射波。闪长岩侵入体因其形状不规则,无明显成层性,往往无法形成明显反射波,多见蚯蚓状无序反射,但在其与沉积地层接触面附近,因与沉积地层反射特征差异,其与沉积地层接触范围仍可大致识别。

## 3 地震工作方法

根据前期勘探成果,本次地震勘探目的层深度约 1000~1500 m,考虑到深部有效信息弱、噪声干扰严重等问题,本次地震勘探采用了二维宽线观测系统(4790-10-20-10-4790),炮点距为 40 m,道距为 20 m,240×2 道接收,覆盖次数为 120 次,采样间隔 0.5 ms,共完成二维测线 3 条,剖面长度 33.52 km,工程部署见图 2a。

对获得的地震资料进行分析,单炮记录呈现以下 3 方面的特点:在时间约 1.0~1.2 s 附近,存在明显的地震反射同相轴;时间 1.2~1.4 s 存在部分弱反射;时间 1.4 s 以下反射特征不明显,信噪比较低(图 4a)。主要目的层应在新生界底界面反射下约 0.2 s 范围内,因此,资料处理的重点是提高该部分资料信噪比。

针对单炮记录中干扰波特点,选择了随机噪声衰减、区域异常振幅压制与去线性干扰等方法组合压制噪声。可以发现,去噪处理后,地震记录上的噪声得到了很好压制,消除了面波及多次波的干扰,信噪比得到了有效提高(图 4b)。进一步对资料进行偏移处理(图 5),经偏移处理后绕射波得到了明显收敛,倾斜反射界面得到了归位,地质构造特征更加明显。剖面自上而下呈现明显的三段分段特征,第一段存在多个横向连续反射同相轴,且底部有显著强反射;第二段约 800~1250 ms,呈现显著的弱反射空白特征;第三段为第二段以深,呈杂乱无章特征,无明显的连续反射同相轴。



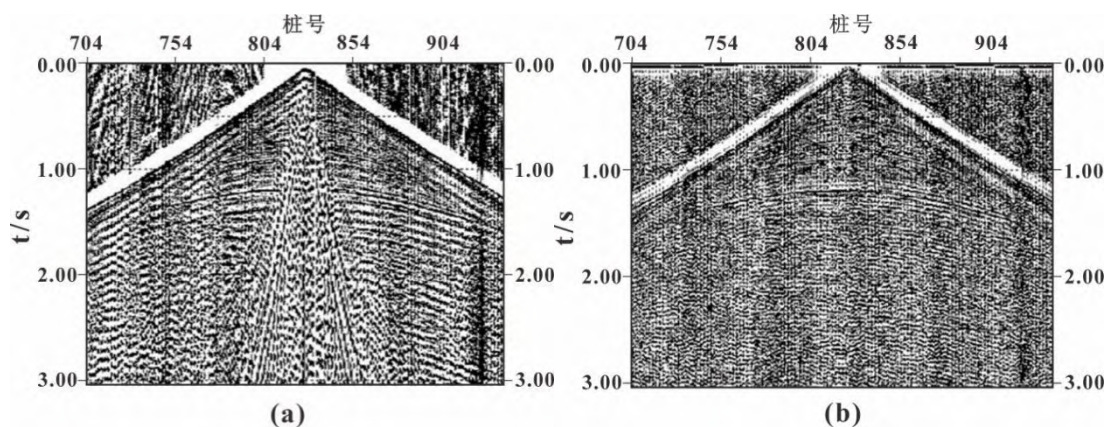


图 4 去噪前 (a) 去噪后 (b) 地震记录  
Fig.4 Before de-noising (a) and after de-noising (b) seismic record

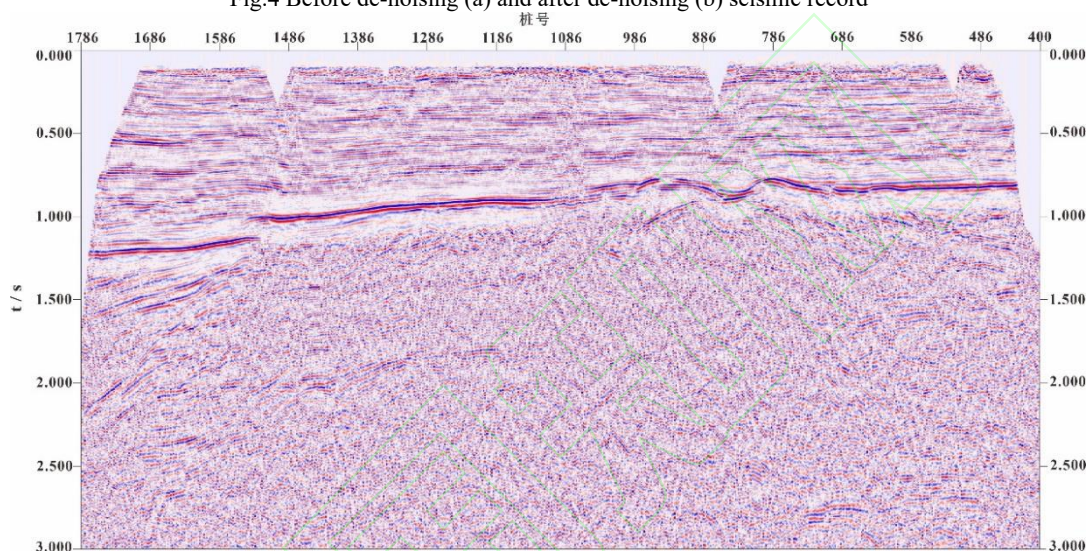


图 5 L1 线偏移剖面  
Fig.5 Migration section of L1 line

## 4 地震特征分析与讨论

### 4.1 地震波组特征分析

根据地震剖面反射特征 (图 6), 在 Z1 线浅部 (0.9 s 位置附近) 存在一能量强、反射轴连续的地震波组, 为新生界底界面反射波 ( $T_n$ );  $T_n$  以下约 0.2 s 范围内地震反射波呈现显著的弱反射空白特征, 与其上下地震反射特征差异明显, 该波组为石炭—二叠系反射特征 ( $T_{c-p}$ ); 石炭—二叠系下部地震反射特征杂乱, 局部呈蚯蚓状, 且剖面上呈大面积分布, 为闪长岩体反射特征 ( $T_y$ ); 根据 ZK1 钻孔揭露显示, 矿体位于石炭—二叠纪地层内, 矿体下部紧邻闪长岩体, 地震时间剖面上未发现明显波组响应特征。



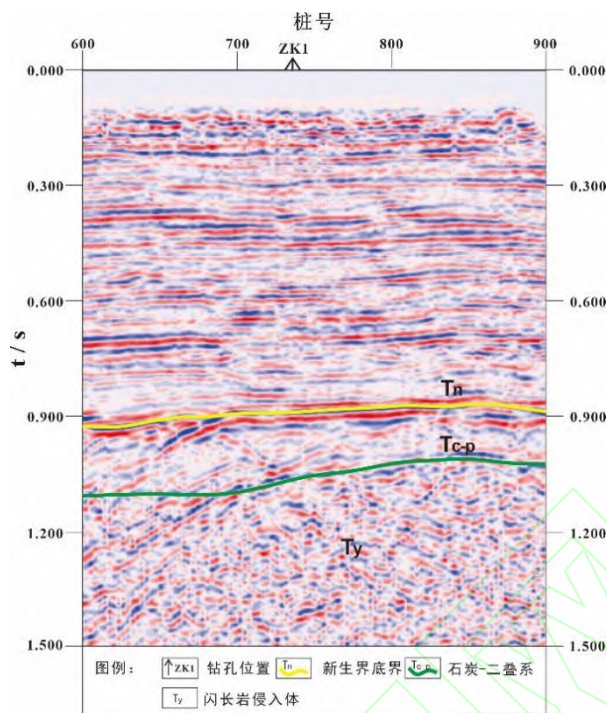


图 6 Z1 线地震时间剖面波组特征对比  
Fig.6 Comparison of wave group characteristics in the Z1 line on the seismic time profile

## 4.2 地层结构与断裂系统

通过上述波组特征分析，完成了研究区二维地震测线地质解释（图 7）。基本查明了测线位置处地层结构与主要断裂带特征。分析发现，研究区地层整体呈现“西北深东南浅”格局，北西向受齐广断裂影响，新生界底界被明显错断；以断裂为界，断裂以南石炭—二叠底界深度约 1 400 m，整体表现平缓；深部可能为大面积侵入的闪长岩侵入体，同时齐广断裂两侧地层差异明显，故推测闪长岩侵入体受到齐广断裂控制影响。

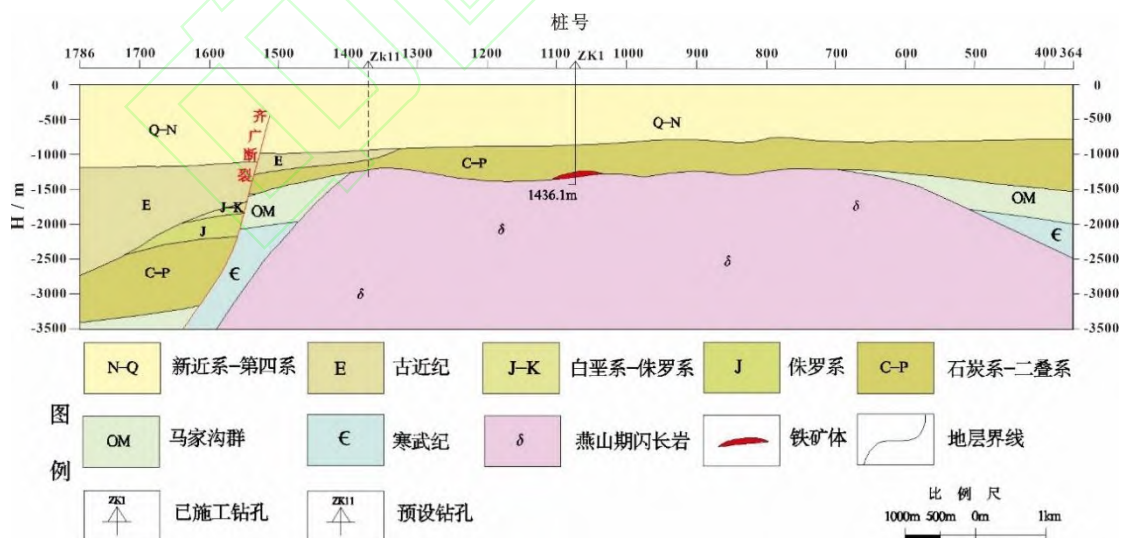


图 7 L1 线地质解释剖面图  
Fig.7 Geological interpretation profile of line L1

### 4.3 地震层位约束下的磁异常分析

Z1 地震线位于 ZK1 钻孔东北方向约 200 m 处, Z2 地震线位于 ZK4 钻孔西南方约 450 m 处, 将钻孔垂直投影到地震剖面后, 根据剖面解释成果(图 8), 对比分析钻孔揭露情况。从钻孔处磁异常特征(参见图 2)来看, 尽管两个钻孔均处于 $\Delta T$ 异常局部凸起位置、化极正异常中心、剩余异常正异常中心、垂向一阶导数正异常中心, 异常特征相近, 但两个钻孔所在位置的地层结构具有明显差异, ZK1 钻孔所在位置闪长岩体无显著凸起, 与地层接触带整体平缓(图 8a), 相反在 ZK4 钻孔(图 8b)处可发现明显的闪长岩体凸起, 与钻孔揭露一致, 根据本文深部磁异常特征模型试验结果认为, 该处的叠加磁异常很可能是岩体凸起导致的异常, 而非矿致异常。

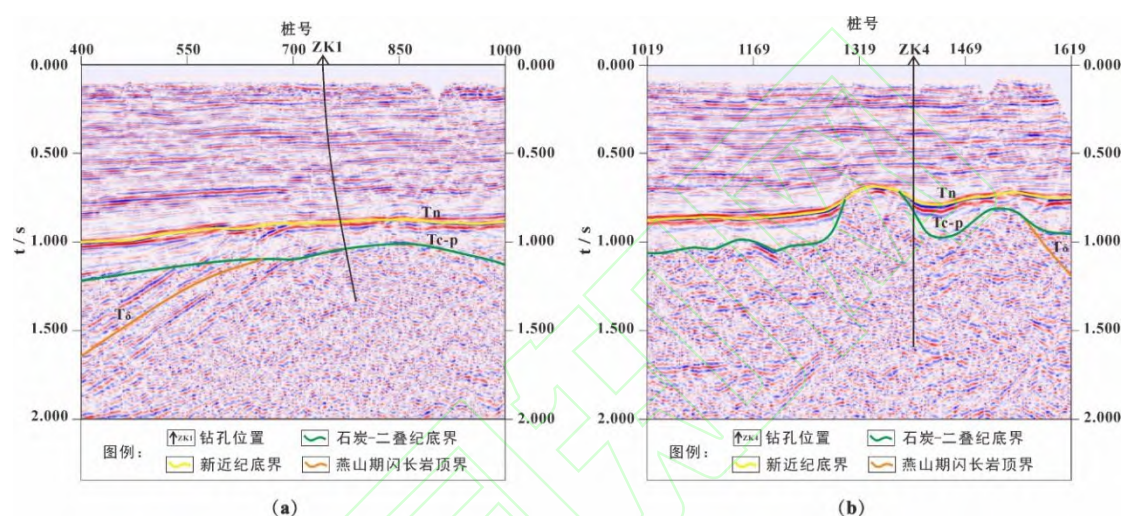


图 8 钻孔附近 Z1、Z2 线的地震剖面解释成果

Fig.8 Interpretation results of seismic profiles of Z1 and Z2 lines near the borehole

结合上述模型试验及实际资料分析, 研究区内叠加次级磁异常主要由两部分引起, 一是由岩体局部凸起导致, 二是为矿致异常导致。因此, 地震层位约束可有效识别矿致磁异常。

### 4.4 矿体定位与钻探验证

L1 线和 Z2 线均穿过 C3 磁异常靶区, 两线交点位置的磁异常特征与 ZK1 钻孔处类似, 具有较大的成矿可能。同时从图 9 可以发现, 相比于 ZK4 钻孔的显著凸起, 桩号 569 (两线交点)附近无明显的闪长岩凸起, 根据前面分析认识, 在岩体埋深、形态都没有明显变化时, 若仍显示有重磁局部异常特征, 则大概率是矿致异常的表现。另外, 从 Z2 线地震时间剖面也可以看出, 该位置相较于大号位置, 闪长岩体边界更深, 理论上因岩体造成的地面重磁异常应更弱, 但实际资料显示异常更强, 说明该异常更有可能是富铁矿体导致; 同时, 该位置靠近齐广断裂, 是闪长岩体侵入的边界, 边界位置仍保留有部分奥陶系灰岩, 这也符合侵入岩与奥陶系碳酸盐岩接触带成矿规律认识。

研究区地层结构和构造信息的确定, 为重磁联合反演提供了准确的层位约束, 降低了反演多解性。选取 Z2 线的重磁剖面(图 10)进行分析, 在距离 2.5 km 和 10.2 km 附近存在局部磁异常。根据 ZK4 钻孔揭露情况和地震剖面特征推断 10.2 km 附近为岩体凸起导致的局部磁场, 而在 2.5 km 附近岩体埋深、形态较两侧无明显变化即岩体无凸起, 推断该处局部磁异常为磁铁矿体引起的磁异常, 在 C3 磁异常内重磁 Z2 线 2.5 km 位置确定了找矿靶区



(图 10)，布设了 ZK11 钻孔进行验证。

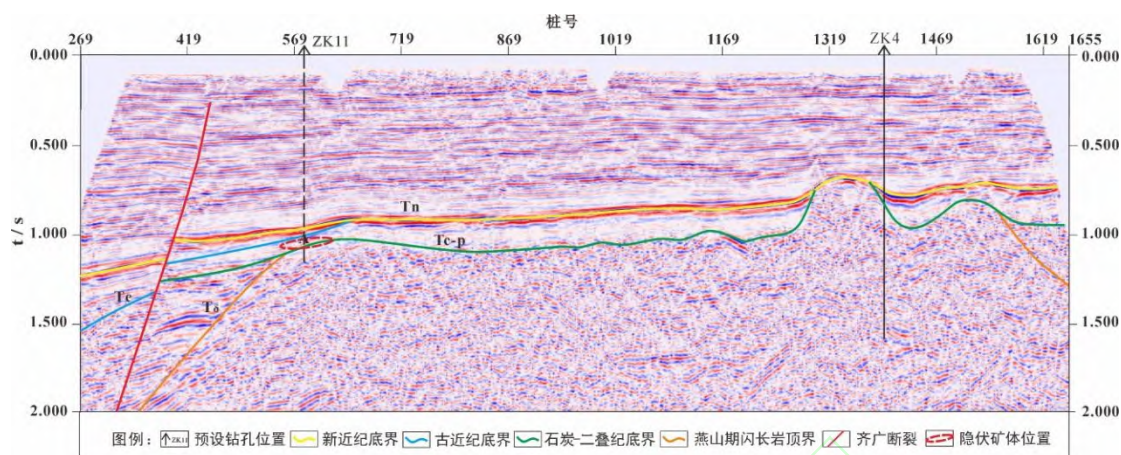


图 9 Z2 线地震时间剖面推断解释结果  
Fig.9 Inferential interpretation of seismic time section of line Z2

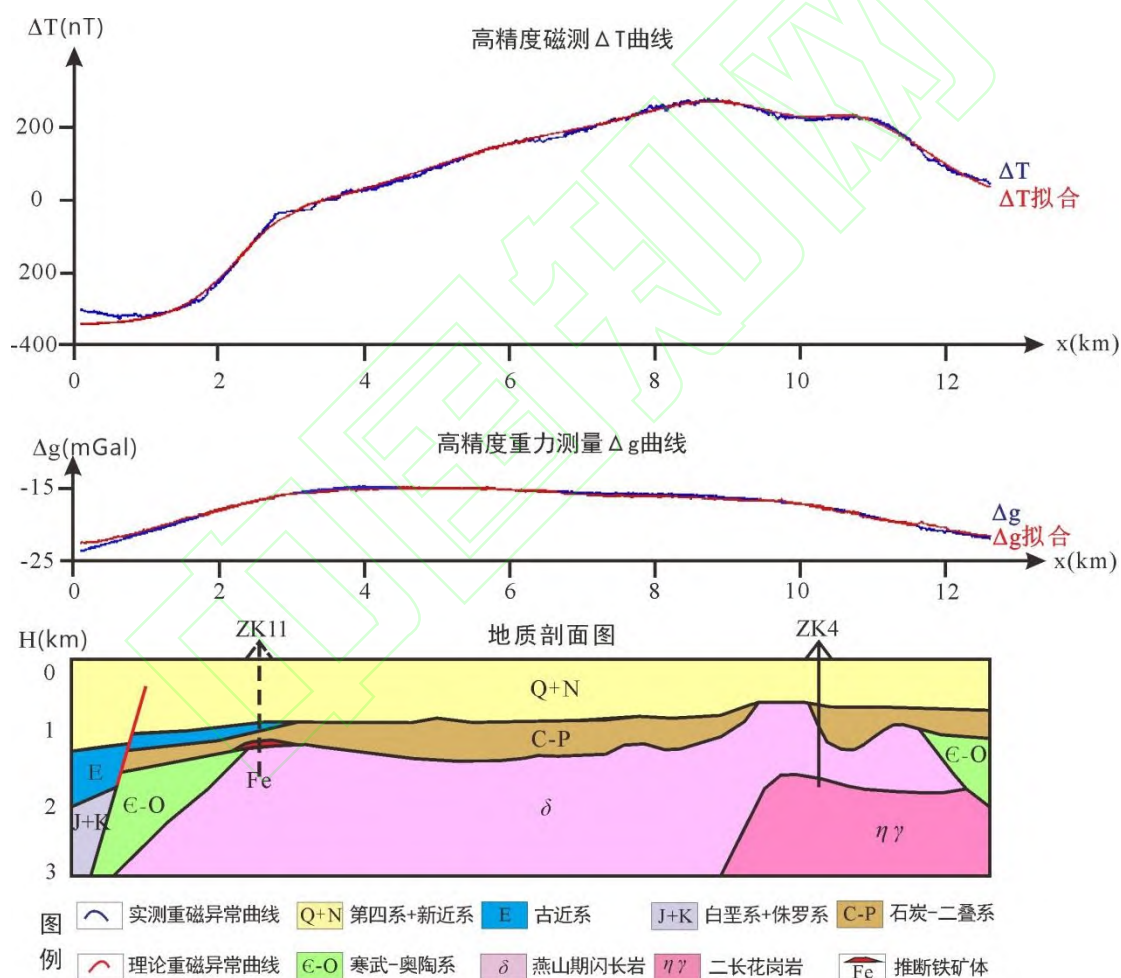


图 10 Z2 线重磁反演结果  
Fig.10 Gravity and magnetic inversion results of Z2 line

ZK11 钻孔在深度 1 186~1 234 m 共揭露 2 层磁铁矿体 (见图 11)，累计厚度 31.54 m，TFe 平均品位 54.25%，与地震-重磁反演结果相吻合，再次印证了深覆盖区“地震精细层界约束+重磁联合反演+钻探深部验证”找矿方法体系的有效性，同时通过 C3 靶区的查证，成功揭露厚层富铁矿体，为齐河—禹城地区开辟了富铁矿找矿新地段，对推动该区富铁矿整装



勘查具有重要意义。

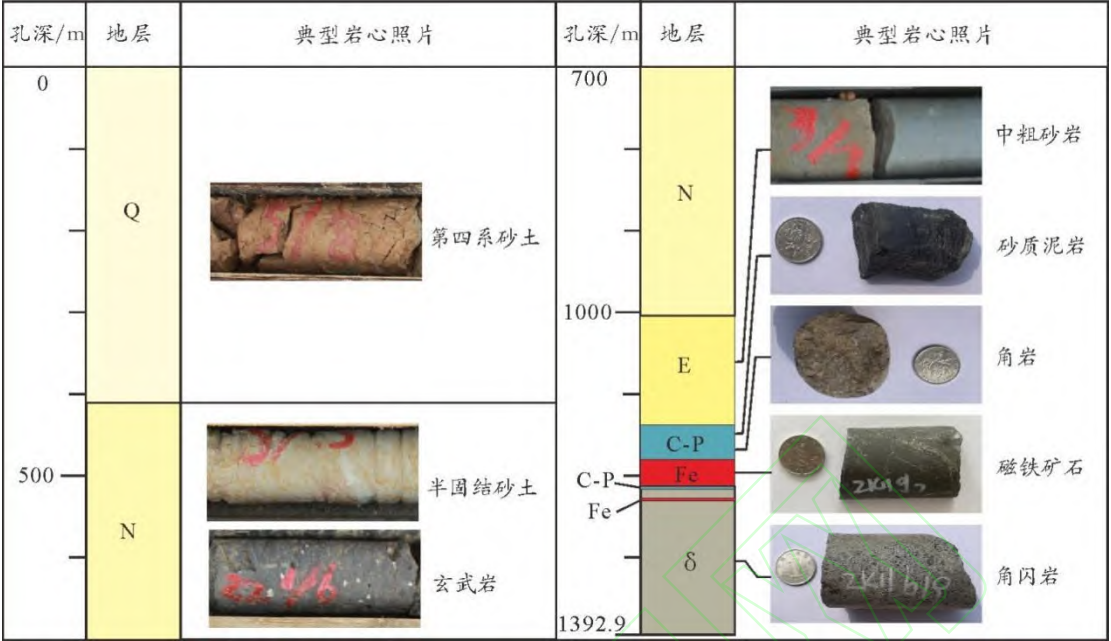


图 11 ZK11 钻孔柱状简图及典型岩心照片  
Fig.11 The histogram and typical core photos of ZK11 borehole

5 结论

(1) 相较于常规的重磁勘探方法，地震勘探方法在深覆盖区富铁矿找矿中可以更好的反映地下地层结构和构造信息。本次地震勘探查明了断裂构造特征，准确划分了新生界底界、石炭—二叠系等地层结构，圈定了侵入岩体的赋存范围和形态特征。

(2) 反射波地震勘探技术协同重磁反演技术，对于识别矿致异常、提高矿体定位精度，进而指导钻孔布设具有重要作用。

(3) 地震勘探方法在深覆盖区富铁矿找矿中发挥了重要的作用，但该方法对矿体的直接识别技术还有待进一步研究，如何识别并确定富铁矿矿体的地震波响应特征，将助力深覆盖区富铁矿取得更大找矿突破。

**致谢:**感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持！

参考文献

[1] ZHANG Z C, HOU T, SANTOSH M., et al. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57, 247-263.

[2] 张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J].中国科学, 2021, 51(6): 827-858.

[3] 王怀洪, 周明磊, 王秀东, 等. 山东省齐河县潘店地区铁矿调查评价报告[R], 2015.

[4] 张增奇, 李英平, 王怀洪, 等. 山东省齐河禹城地区发现大型富铁矿[J]. 山东国土资源, 2016, 32(05): 94.

[5] 朱裕振, 周明磊, 高志军, 等. 山东齐河—禹城地区夕卡岩型富铁矿的发现及其意义[J]. 地质通报, 2018, 37(05): 938-944.

[6] 张招崇, 王怀洪, 谢秋红, 等. “禹城式”夕卡岩型富铁矿的形成机制[J]. 现代地质, 2024. 38(1): 1-12.

- [7] 李强, 田思清. 山东省齐河—禹城地区夕卡岩型铁矿磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的指示意义[J]. 山东国土资源, 2021, 37(01): 1-9.
- [8] 周明磊, 汝亮, 朱裕振, 等. 山东齐河—禹城地区重磁场特征及找矿预测[J]. 物探与化探, 2021, 45(02): 301-307.
- [9] 王怀洪, 沈立军, 王东东, 等. 山东黄河北煤田中生代岩浆侵入与古生代多矿产成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(02): 83-92.
- [10] ZHU Y, ZHANG Z, SHEN L, et al. Geochronology and geochemistry of Late Mesozoic diabase in the Litun ore district, North China Craton[J]. Geological Journal, 2021, 56(9): 4735-4746.
- [11] ZHU Y, ZHANG Z, SHEN L, et al. First report on zircon U-Pb age (125.9 Ma) of the quartz monzonite from the Pandian skarn iron deposit in the Luxi area, Eastern China[J]. China Geology, 2022, 5(1): 185-187.
- [12] 沈立军, 朱裕振, 王怀洪, 等. 山东齐河—禹城地区李屯富铁矿床地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2021, 67(01): 84-98.
- [13] 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 等. 鲁西齐河地区铁矿控矿特征及找矿标志[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(04): 982-991.
- [14] 沈立军, 朱裕振, 高志军. 山东齐河—禹城富铁矿区李屯岩体地质特征初探[J]. 山东国土资源, 2020, 36(02): 23-29.
- [15] 郭延明, 郝兴中, 钟伟杰, 等. 地面高精度磁测在隐伏铁矿勘查中的应用: 以山东省禹城市李屯地区铁矿为例[J]. 山东国土资源, 2017, 33(10): 52-56.
- [16] 朱裕振, 强建科, 王林飞, 等. 深埋铁矿磁测数据三维反演分析与找矿靶区预测[J]. 物探与化探, 2019, 43(06): 1182-1190.
- [17] 沈立军, 朱裕振, 李双, 等. 地球物理测井在金属矿深部找矿中的应用[J]. 测井技术, 2021, 45(04): 431-438.
- [18] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(07): 2331-2345.
- [19] 勾丽敏, 刘学伟, 雷鹏, 等. 金属矿地震勘探技术方法研究综述: 金属矿地震勘探技术及其现状[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(01): 16-24+46+11.
- [20] 王怀洪, 朱裕振, 孙超, 等. 反射地震在胶东西北部变质岩区深部构造探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(01): 267-273.
- [21] MANZI M S D, GIBSON M A S, HEIN K A A, et al. Application of 3D seismic techniques to evaluate ore resources in the West Wits Line goldfield and portions of the West Rand goldfield, South Africa[J]. GEOPHYSICS, 2012, 77(5): WC163-WC171.
- [22] 吕庆田, 董树文, 汤井田, 等. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4319-4343.
- [23] 王柯洪, 王治国, 高静怀, 等. 金属矿产资源探测的地震方法: 综述与展望[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(4): 1607-1629.
- [24] EATON D W, ADAM E, MILKEREIT B, et al. Enhancing base-metal exploration with seismic imaging [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2010, 47(5): 741-760.
- [25] CAMPBELL G. Exploration geophysics of the Bushveld Complex in South Africa[J]. The Leading Edge, 2011, 30(6): 622-638.
- [26] UROSEVIC M, BHAT G, GROCHAU M H. Targeting nickel sulfide deposits from 3D seismic reflection data at Kambalda, Australia[J]. Geophysics, 2012, 77 (5): WC123-WC132.
- [27] 徐明才, 姜春香, 柴铭涛, 等. 内蒙古准苏吉花铅矿及外围反射地震和层析成像探测[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(04): 1811-1817.
- [28] 周建勇. 地震方法在深部找矿中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [29] 刘建勋, 周建勇, 徐明才, 等. 地震勘查技术在喀拉通克矿区的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(03): 437-444.
- [30] 杜宏杰. 高精度二维地震勘探在多金属矿勘查中的应用[J]. 现代矿业, 2022, 38(10): 40-42+46.
- [31] 张文艳, 朱裕振, 刘雪, 等. 山东禹城李屯地区重磁异常特征与找矿预测[J]. 现代地质, 2024, 38 (01): 68-76.